

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ de PARIS-DAUPHINE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR EN SCIENCES

Spécialité

MATHÉMATIQUES APPLIQUÉES ET TRAITEMENT
D'IMAGES

par

Thomas DESCHAMPS

Sujet de la thèse :

**EXTRACTION DE COURBES ET SURFACES
PAR MÉTHODES DE CHEMINS MINIMAUX ET
ENSEMBLES DE NIVEAUX. APPLICATIONS
EN IMAGERIE MEDICALE 3D.**

Soutenue le 20 décembre 2001 à l'Université devant un jury composé de :

M	Olivier	FAUGERAS	Président
M	Philippe	CINQUIN	Rapporteurs
M	Ron	KIMMEL	
M	Laurent	COHEN	Directeur
Mme	Françoise	DIBOS	Examineurs
M	Sherif	MAKRAM-EBEID	
M	Wiro	NIESSEN	
M	Nicolas	ROUGON	

A toi

(*J. Dassin*, 1938-1980)

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord Messieurs Philippe Cinquin et Ron Kimmel pour avoir accepté le travail de rapporteurs de cette thèse. Monsieur Cinquin a été le premier à me faire entrevoir les possibles applications mathématiques au domaine médical, lors d'une présentation des activités de son laboratoire. En ce qui concerne Monsieur Kimmel

אני מודה מאוד את רון קמל על כך שעשה דרך ארוכה כדי להשתתף בוועדת הבוחנים

Madame Françoise Dibos, qui m'a il y a bien longtemps enseigné les principes fondamentaux du traitement du signal, a accepté de participer à ce jury. Je tiens à l'en remercier, tout comme Monsieur Olivier Faugeras, pionnier de la vision par ordinateur, dont l'influence s'étend aussi maintenant au domaine médicale.

Monsieur Nicolas Rougon, figure omniprésente du traitement d'image et des modèles déformables, me fait aussi l'honneur d'être membre du jury.

Ik zou in het bijzonder een dankwoord willen richten aan mijnheer Wiro Niessen, die helemaal uit het hoge noorden hierheen is gekomen. Het is voor mij een eer om een specialist inzake medische beeldverwerking in de jury te hebben.

Pour m'avoir guidé dans mes recherches tout au long de cette thèse, et pour m'avoir laissé aller dans les directions qui m'intéressaient, pour m'avoir appris à communiquer sur mon travail et encouragé à publier, je tiens à remercier Monsieur Laurent Cohen. Merci de m'avoir fait confiance, et de m'avoir poussé en avant.

Monsieur Sherif Makram-Ebeid me fait l'honneur et l'amitié d'être lui aussi membre du jury. Ses compétences autant théoriques que techniques ont toujours été pour moi digne du plus grand respect. Son dynamisme et son aisance avec l'ensemble des théories de la vision (et autres) resteront pour moi un modèle du genre.

Je souhaite remercier toute l'équipe du groupe MedISys de Philips Recherche France, pour m'avoir accueilli en son sein depuis déjà plus de trois ans. La participation des gens de cette équipe à mon travail ne se limite pas à l'enseignement que j'ai pu tirer de leurs compétences et aux nombreuses contributions de chacun à mon ouvrage. Au delà de la bonne humeur et de l'ambiance sympathique, j'ai vraiment apprécié de faire partie de ce groupe: Cyrille Allouche, Odile Bonnefous, Jacques Breitenstein, Antoine Collet-Billon, Claude Cohen-Bacrie, Eric Denis, Maxim Fradkin, Raoul Florent, Olivier Gérard, Laurence Germond, Yves Hily, Françoise Iritz, Marie Jacob, Jean-Michel Lagrange, Pierre Lelong, Claire Lévrier, Claude Méquio, Lucille Nosjean, Jean Pergrale, Jean-Michel Rouet, Michel Siméon, et Nicolas Villain. J'en profite pour remercier Sandra Delcorso pour m'avoir soutenu pendant ces derniers mois de travail.

Pour ceux qui ont quitté le groupe entre temps, je souhaiterais distribuer quelques remerciements, notamment à Jean-Michel Létang, qui a été mon “parrain” au sein de l’équipe, et a guidé mes premiers pas dans le domaine de la recherche industrielle, tout en me faisant bénéficier de sa rigueur et sa créativité. Une mention très spéciale revient tout naturellement à Xavier Merlihot et aussi Myriam Greff, anciens stagiaires du groupe: travailler avec vous a été plus qu’un plaisir, et je ne peux que reconnaître l’influence primordiale de nos collaborations sur ma thèse, pour les “Ensembles de Niveaux” en ce qui concerne Xavier, et le “Live-Wire” pour Myriam. Vos compétences sont grandes et j’ai pris grand plaisir à travailler avec vous, et à inclure dans ma thèse le fruit de ces collaborations.

Au sein de la galaxie Philips, je tiens à remercier l’équipe MIMIT-Advanced Development de Frans Gerritsen, et en particulier Roel Truyen et Bert Verdonck, pour leur accueil chaleureux, et leur intérêt pour mon travail qui s’est trouvé concrétisé dans le développement de certains prototypes, et dans plusieurs publications communes.

Mes derniers remerciements vont tout naturellement à ceux qui m’ont soutenu pendant ces longues années d’études, c’est à dire à mes parents et toute ma famille. Merci aussi à tous mes amis qui ont su supporter les baisses de moral d’un chercheur souvent égaré voir perdu entre deux raisonnements. Vous êtes trop nombreux pour tous vous citer, mais mes remerciements s’adressent au clan de Boulogne-Billancourt, dans son sens le plus large. Je tiens à remercier Hélène Sellier pour m’avoir laissé mettre à contribution son grand talent pour le dessin et autorisé à mettre des représentations de ses oeuvres au début de chacune de mes parties. Et enfin merci à ceux et celles qui ont su me donner la force et la motivation nécessaires pour terminer, qui ont su, du fait de leur soutien, de leur présence ou de leur simple existence, donner une signification et un but à tout cela.

Thomas Deschamps
Paris, Décembre 2001

Contents

Remerciements	v
Abbreviations	xi
Introduction	1
I Extraction de Chemins	5
1 Les Chemins Minimaux en Traitement d’Images	9
1.1 Minimal Paths theory	10
1.1.1 The minimal path in geometrical optic	10
1.1.2 Minimal path for curve extraction	11
1.2 The Cohen-Kimmel Method in 2D	12
1.2.1 Global minimum for Active Contours	12
1.2.2 Problem formulation	13
1.3 Numerical Implementation	14
1.3.1 Graph Search Algorithms and Metrication Error	14
1.3.2 Fast Marching Resolution	15
1.3.3 Back-propagation	17
1.3.4 Comparing Dijkstra and Eikonal	17
1.4 The Regularity of the Path	19
1.4.1 Influence on the gradient descent scheme	19
1.4.2 Influence on the number of points visited	20
2 Nouvelles Techniques d’Extraction de Chemins à l’Aide du <i>Fast-Marching</i>	23
2.1 3D Extension	24
2.2 Several minimal path extraction techniques	24
2.2.1 Partial Front Propagation	26
2.2.2 Simultaneous Front Propagation	27
2.2.3 Euclidean Path Length Computation	29
2.3 Path centering in linear objects	30
2.3.1 Segmentation step	31
2.3.2 Centering the path	32

2.3.3	Description of the method	33
2.3.4	Comparison with other work	36
2.4	Introducing the angle as a dimension	37
2.4.1	Principles	37
2.4.2	Algorithmic tricks	38
2.4.3	Results	38
2.4.4	Perspectives	39
2.5	Introducing recursivity in the Eikonal equation	39
3	Application à l'Endoscopie Virtuelle et à Plusieurs Problèmes en Imagerie Médicale	41
3.1	<i>Virtual Endoscopy</i>	42
3.1.1	Medical relevance	43
3.1.2	Problem with the path construction	45
3.1.3	Proposed solution for colonoscopy	46
3.1.4	Results on objects filled with air	48
3.1.5	Results on Arteries and vessels	49
3.1.6	Clinical study	53
3.1.7	Last developments and perspectives	58
3.2	Live-Wire	59
3.2.1	Existing methods	61
3.2.2	Adaptations and improvements	65
3.2.3	Dedicated potential	66
3.2.4	<i>Path-Cooling</i> improvement	69
3.2.5	<i>On-The-Fly</i> training improvement	70
3.2.6	Conclusion	75
3.2.7	Perspective	76
II	Extraction de Surfaces	79
4	Modèles Déformables pour l'Extraction de Surfaces en Imagerie Médicale	83
4.1	Classical Active Contours	84
4.1.1	Definition	84
4.1.2	Drawbacks	84
4.2	Geodesic Active Contours	85
4.3	<i>Level-Sets</i> Implementation of the Geodesic Active Contours	86
4.3.1	Advantages of this formulation	87
4.3.2	Different Motions of the interface	89
4.4	Region-based forces	92
4.4.1	Partitioning the image domain	92
4.4.2	Region descriptors	93
4.4.3	Boundary descriptors	94
4.4.4	Segmentation as an optimization process	94
4.5	Segmentation with <i>Fast-Marching</i> algorithm	96

4.6	Medical imaging applications of the <i>Level-Sets</i>	96
4.6.1	Cortex segmentation	97
4.6.2	Brain Vessels	98
4.7	Summary	99
5	Différentes Stratégies de Segmentation Basées sur les <i>Level-Sets</i> et le <i>Fast-Marching</i>	101
5.1	Interactive Segmentation with the Level-Sets Framework	102
5.1.1	Interactivity requirements for the level-sets paradigm	102
5.1.2	Fixing a point of the contour	103
5.1.3	Re-initializing the contour	104
5.1.4	Conclusion on the interactivity	106
5.2	Region Based Forces	107
5.2.1	Gaussian descriptors	107
5.2.2	Modified Gaussian descriptors	107
5.2.3	Sigmoid descriptors	108
5.2.4	Numerical implementation of the level-sets paradigm	108
5.3	Using the Fast-Marching for segmentation	112
5.3.1	Comparison with the watershed algorithm	112
5.3.2	Interactive segmentation with the Fast-Marching	114
5.4	Combining Fast-Marching and Level Sets	118
5.4.1	Advantages and Drawbacks of <i>Fast-Marching</i>	118
5.4.2	Advantages and Drawbacks of <i>Level-Sets</i>	119
5.4.3	Combining two complementary methods	120
6	Applications de la Combinaison des Techniques de <i>Fast-Marching</i> et de <i>Level-Sets</i> à l'Extraction de Surface	121
6.1	Segmentation of cerebral aneurysms	122
6.1.1	Description of the acquisition system	124
6.1.2	Application to the segmentation of brain aneurysms	124
6.1.3	Perspective	128
6.2	Detection of Colon Polyps	129
6.2.1	Segmentation of the colon surface	129
6.2.2	Visualization of the colon polyps	131
6.2.3	Perspectives	133
III	Visualisation et Quantification de Structures Anatomiques Arborescentes	137
7	Outils de Visualisation et de Mesure	141
7.1	Visualization of 3D segmentation	142
7.1.1	Virtual reality notions	142
7.1.2	Visualization of a level-set	143
7.1.3	Problem with the <i>Marching-Cubes</i>	144
7.1.4	Restoring the distance function	145

7.1.5	Volume versus Surface Rendering	147
7.2	Measurement Tools	148
7.2.1	Gauss Theorem	148
7.2.2	Volume Measurement	149
7.2.3	Example of volume measurement: an aneurysm	150
7.2.4	Section Measurement	150
8	Extraction de Structures Arborescentes	155
8.1	Introduction	156
8.2	Motivation	156
8.2.1	Tree extraction	156
8.3	Design of an adequate initialization algorithm	158
8.3.1	Propagation Freezing for Thin Structures	158
8.3.2	Suitable stopping criterion	162
8.4	Extracting the skeletal information	164
8.4.1	Combining path and shape extraction	165
8.4.2	From Trajectories to Tree Extraction	169
9	Application à l'Extraction, la Visualisation, et la Quantification d'Objets Anatomiques Arborescents	175
9.1	Application to 3D Vascular Images with Multiscale Vessel Enhancement	176
9.1.1	Medical relevance	176
9.1.2	Proposed solution	178
9.1.3	Comparisons and conclusion of the tree extraction method	179
9.2	Application to the Bronchial Tree	183
9.2.1	Medical interest	183
9.2.2	State of the art in Bronchoscopy imaging	184
9.2.3	Applying our framework	186
9.2.4	Conclusion	190
9.3	Reconstruction of vessels in 2D and 3D images using <i>Perceptual Grouping</i>	193
9.3.1	Finding Contours from a Set of Connected Components	194
9.3.2	Finding a Set of Paths in a 3D Image	199
9.3.3	Conclusion	201
	Conclusion	203
	Bibliography	207
	Publications	217
	Curriculum Vitae	219

Abbreviations

1D	one-dimensional
2D	two-dimensional
3D	three-dimensional
3DRA	3D rotational angiography
AAA	abdominal aortic aneurysm
CAF	cost assignment function
CNR	contrast-to-noise ratio
CT	computed tomography
CTA	computed tomography angiography
CRC	colorectal cancer
DSA	digital subtraction angiography
DSR	digital subtraction radiography
fMRI	functional magnetic resonance imaging
Gd-DTPA	gadopentetate dimeglumine
GWDT	gray-weighted distance transform
MDL	minimum description length
MIP	maximum intensity projection
MPR	multi planar reformatting
MRA	magnetic resonance angiography
MRI	magnetic resonance imaging
pixel	picture element
SNR	signal-to-noise ratio
TTP	Tissue Transition Projection
US	Ultrasound (Imaging)
VOI	Volume of Interest
voxel	volume element
XRA	X-ray angiography

Introduction

Contexte

Le volume d'images médicales produites dans le monde est en constante augmentation depuis plusieurs décennies. L'utilisation d'images tridimensionnelles devient de plus en plus fréquente et les volumes de données produits par les hopitaux demandent d'importantes ressources de traitement. Si les images 2D suffisent à de nombreuses applications et sont largement utilisées pour des raisons de coût d'acquisition, l'utilisation d'images 3D tend à se banaliser.

De l'héritage des images 2D, il reste que les images 3D sont souvent produites comme une succession de coupes. Le praticien doit mentalement "empiler" les coupes pour se faire une représentation du volume des données observées. Cela conduit à une interprétation subjective des données, et la plupart des traitements manuels coupe à coupe conduisent à une perte d'information, puisqu'une dimension n'est pas prise en compte.

L'interprétation automatique d'images médicales étudiée principalement dans cette thèse est la segmentation, ou l'isolement du reste de l'image, d'une structure anatomique d'intérêt dans le but de la visualiser, et la mesurer. Ce processus de segmentation consiste à isoler les structures visibles par délimitation de leurs contours, et le nombre de méthodes proposées en traitement d'images va croissant. On peut classifier de manière très générale les outils de segmentation en deux catégories: l'approche directe consiste à appliquer des opérateurs travaillant sur l'information de l'image directement, tandis qu'une approche par modèle fait intervenir une modélisation de l'objet recherché, en introduisant une information à priori sur l'objet recherché.

En particulier, les objets tubulaires peuvent être extraits et visualisés à l'aide de techniques utilisant un à priori sur leur forme. La meilleure manière d'étudier ce genre d'objets est d'en extraire la surface, et la structure sous-jacente, autrement dit squelette, pour les parcourir, visualiser et quantifier.

En utilisant des techniques issues de l'optique géométrique et de la propagation de la lumière dans un milieu continu, nous allons étudier précisément des implémentations rapides et efficaces d'extraction des surfaces d'objets tubulaires, ainsi que de leurs primitives géométriques, les courbes qui définissent leur squelette. Nos méthodes seront spécifiquement dédiées à l'à priori que nous avons de la forme de ces objets. Ainsi nous aurons à notre disposition un ensemble de descriptions et d'outils d'interprétation qui nous permettront tout aussi bien de visiter "virtuellement" ces objets, que de créer des outils d'aide à la décision pour tout ce qui concerne l'étendue

de pathologies, et le choix de leur traitement.

Plan

Nous proposons tout d'abord dans la première partie une étude de différents problèmes liés à l'extraction de chemins dans les images médicales 2D et 3D. Le premier chapitre est une revue des différentes techniques déjà utilisées dans ce domaine, en particulier tout ce qui est liée aux chemins minimaux, que leur formulation soit discrète ou continue. Par la suite, on se focalise sur la formulation qui est dérivée de celle des contours actifs géodésiques, et d'un schéma rapide de calcul de ces chemins, basé sur une formulation implicite du problème à l'aide d'Ensembles de Niveaux. Le second chapitre contient l'essentiel des recherches poursuivies dans le domaine de l'extraction de chemins, qu'elle soit automatique ou interactive, dans le but de faciliter cette tâche, en l'automatisant au maximum, et en réduisant les couts qu'elle génère. Le troisième chapitre est celui qui présente deux applications de toutes les techniques du chapitre précédent. Une concerne l'endoscopie virtuelle où le chemin à extraire est celui d'une caméra virtuelle qui se déplace dans des images volumiques, et la seconde est le développement d'un outil de segmentation interactive et temps-réel, basé sur les mêmes principes jusque là étudiés.

Suivant le même enchainement, la deuxième partie se penche sur l'extraction de surface, en utilisant le même formalisme des Ensembles de Niveaux que dans la première partie. Le chapitre 4 fait le tour de la question sur l'application de ce formalisme en segmentation de surfaces en imagerie médicale tridimensionnelle. Le chapitre 5 contient diverses implémentations visant à améliorer quelques défauts de ces techniques qui sont notamment: l'introduction d'interactivité dans le processus de segmentation, et la diminution des temps de calculs parfois exorbitants. Le chapitre 6 fait lui la part belle aux applications en présentant deux utilisations des méthodes d'extraction de surface: d'une part pour visualiser les anévrismes cérébraux, dont l'étude de l'étendue peut mener à optimiser le processus chirurgical nécessaire à leur traitement, et d'autre part à l'extraction et la visualisation des polypes du colon, qui sont des tumeurs pour lesquelles l'efficacité du traitement approprié dépend de manière critique de leur détection à un stade peu avancé.

La troisième partie est dédiée à l'étude de structures anatomiques beaucoup plus spécifiques: les structures arborescentes, comme tout ce qui est vasculaire ou artériel, dans le but d'optimiser la visualisation des objets, mais aussi de quantifier l'étendue des pathologies qu'ils présentent. Dans le chapitre 7, on commence par détailler les outils qui vont permettre de quantifier ces pathologies, sur la base des surfaces et courbes extraites dans l'image. Le chapitre 8 fait le lien entre tous les travaux précédemment accumulés, dans le but d'extraire dans un même processus, la surface ainsi que le squelette des objets considérés, en utilisant nos outils d'extraction de chemins et de surfaces des deux premières parties. Dans ce chapitre, les outils sont spécifiquement dédiés à la topologie si particulière des objets étudiés. Cette information de surfaces et d'arbre centré à l'intérieur de nos objets tubulaires nous amène naturellement à appliquer notre méthode, dans le chapitre 9, à l'extraction de veines et d'artères dans des images médicales 3D, puis au problème plus complexes de l'extraction de l'arbre

bronchique. Nous terminons avec une autre méthode de reconstruction d'arbres vasculaires, à l'aide de méthodes dérivées du groupement perceptuel.

Contributions

Dans la première partie notre contribution sur l'extraction de chemins est tout d'abord d'un point de vue technique d'avoir amélioré l'extraction de chemins de manière significative

- en étendant au 3D la méthode de Cohen et Kimmel [34];
- en réduisant les couts de calculs de cette méthode, et l'interactivité nécessaire;
- en développant une méthode originale d'extraction de chemins centrés;

Par ailleurs, dans cette même partie, les applications développées sur la base de nos méthodes ont mené à des implémentations fiables et validées cliniquement, en ce qui concerne l'endoscopie virtuelle, suggérant de nombreuses perspectives.

Dans la seconde partie, notre contribution est avant tout d'avoir

- développé un algorithme rapide de pré-segmentation basé sur les techniques de chemins minimaux et en particulier l'algorithme du *Fast-Marching* ;
- détaillé des techniques pour améliorer l'interactivité des *Level-Sets* , méthodes connues pour leur grande précision et leur gestion des changements de topologies des objets à segmenter, mais leur faible potentiel en matière d'interactivité;
- proposé une approche collaborative à deux méthode complémentaires, telle que le *Fast-Marching* et les *Level-Sets* , de manière plus formelle que cela avait été fait auparavant dans le domaine.

De plus, ces développements se justifient dans les applications qui sont faites par la suite dans le dernier chapitre de cette partie sur la segmentation rapide et la visualisation d'objets complexes, en imagerie médicale tridimensionnelle.

Enfin dans la dernière partie, nous présentons des contributions spécifiques dans le domaine de l'extraction et la quantification de structures tubulaires et arborescentes:

- en utilisant le même formalisme de chemins minimaux, nous présentons une technique originale pour pré-segmenter rapidement les objets tubulaires;
- nous trouvons comment récupérer simultanément un ensemble de trajectoires dans ces objets arborescents;
- nous expliquons comment remonter à l'information d'arbre à partir de ces trajectoires.

En pour finir, nous détaillons une application de ces méthodes développées précédemment à plusieurs problèmes concrets en imagerie médicale: la segmentation et la reconstruction d'arbres vasculaires, en présence de sténoses ou d'anévrismes , et d'arbres bronchiques dans des images scanners des poumons.